



Projet de fin d'études

La mutualisation des systèmes énergétiques à l'échelle du macro-lot



Effets de la mutualisation des systèmes énergétiques sur le bilan énergétique global des macro-lots : cas appliqué au macro-lot Rosa Parks à Paris

Alban Ménard

Polytech Tours, Département d'Aménagement et Environnement, 35 Allée Ferdinand de Lesseps, 37200 Tours

| ARTICLE INFO | RÉSUMÉ |
|---|---|
| Mots clés : Energie Macro-lot Mutualisation Récupération de chaleur Photovoltaïque | Au vu des enjeux énergétiques actuels et futurs, les villes vont avoir un rôle important dans la transition énergétique. De nombreux leviers urbains existent pour réaliser des économies d'énergies. Le macro-lot comme structure urbaine peut, au travers de leur conception, répondre en partie à ces enjeux. Cet article présente un bilan énergétique du macro-lot Rosa Parks de Paris. Il se base sur un modèle simulant la consommation et la production d'énergie de chaque fonction du macro-lot et compare un cas décentralisé à un cas mutualisé. L'objectif étant de savoir si la mutualisation des systèmes énergétiques d'un macro-lot peut permettre une économie d'énergie. |

1. Introduction

L'aménagement est aujourd'hui largement régi par une cogérance entre le public et le privé où le premier est généralement initiateur du projet et le deuxième réalisateur. Dans la conception de projets d'aménagement, les dialogues et les échanges entre acteurs sont favorisés au détriment d'une approche descendante où la collectivité fixe les règles. Dans ce contexte de gestion et production de la ville, le recours à des opérations d'aménagement groupées comme les « macro-lots » se démocratisent au détriment d'une production basée sur des parcelles. Les « macro-lots », sont des opérations d'aménagement associant le public et le privé. Ils n'ont pas de valeur juridique mais sont « une modalité de production de la ville ». Ils sont obligatoirement régis par plusieurs maîtres d'ouvrage. Ainsi chaque unité foncière va être élaborée par différents architectes et maîtres d'œuvre, et chaque unité possédera différents maîtres d'ouvrage. [CEREMA] L'objectif de ces macro-lots étant d'aboutir à une offre plus cohérente et plus concertée en accueillant des activités variées (habitats, bureaux, commerces, équipements, etc). [LUCAN Jacques]

Ces îlots mixtes, apparaissent dans un contexte où les enjeux environnementaux ont une place de premier ordre. En effet, alors que la France s'est engagée à réduire les émissions de CO2 sur son territoire, le secteur du bâtiment (tertiaire et résidentiel) possède une part de responsabilité non négligeable avec près de

45% de la consommation d'énergie finale française. Pour y remédier, différents objectifs ont été fixés et notamment augmenter de 32% la part de production d'énergie renouvelable d'ici 2030 et améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. Différentes solutions existent dont la rénovation du parc de bâtiments ou l'amélioration des systèmes de chauffages et des équipements électriques. Cependant pour atteindre ces objectifs d'autres pistes sont étudiées. En effet, certains auteurs proposent une remise en cause de la conception des réseaux énergétiques principalement en place pour les repenser en favorisant la proximité. Cette approche doit permettre de favoriser la mutualisation et remplacer les ressources généralement utilisées. [Bahers Jean-Baptiste, Durand Mathieu]

Le macro-lot permet une action coordonnée et globale sur une zone donnée et de proximité. Ainsi ce projet urbain peut être utilisé comme levier pour réduire les besoins énergétiques des villes et favoriser les énergies renouvelables et de récupération. La variété des activités présentes dans les macro-lots et leur proximité peuvent permettre une valorisation complémentaire d'usages et de productions d'énergie fatale et ainsi permettre une économie d'énergie significative. [RAINEAU Laurence] Par exemple les heures d'occupation et donc de consommation d'énergie diffèrent selon l'activité exercée dans un bâtiment.

Or, les énergies vertes, issues du photovoltaïque, de l'éolienne, de l'hydraulique, de la biomasse... sont considérées

comme renouvelables car elles sont présentes en quantité tellement vaste qu'elles sont inépuisables. De plus, la puissance du soleil semble être infiniment grande puisqu'au zénith par temps clair et avec un angle de 45°, la Terre reçoit au niveau du sol une puissance par mètre carré de 1000W. Par comparaison, cela représente presque la puissance d'un réacteur nucléaire par kilomètre carré. Cependant, aujourd'hui l'énergie photovoltaïque ne représente que 1,7% de la production en France et seulement 1% dans le monde. [LINCOT Danie] L'énergie solaire est certes présente en quantité astronomique, mais elle n'est pas puisable sur toutes les heures de la journée ni durant toute l'année ce qui limite grandement son utilisation. Il en est de même pour les consommations électriques qui varient énormément au cours de la journée. Cette intermittence de production et de besoin peut s'avérer être problématique si l'on veut obtenir un système de production efficient. Par conséquent, l'irrégularité de la production et de la consommation, engendre une part d'excédents et de déficits de l'énergie photovoltaïque incertaine. A l'intermittence s'ajoute les conditions météorologiques qui ont un lourd impact sur le rendement de la production. Ainsi d'une journée à une autre, l'énergie que peut produire des panneaux photovoltaïques varie énormément ce qui accentue le phénomène précédemment cité. Aujourd'hui pour y remédier, la solution qui est généralement proposée est celui du stockage de l'excédent. Cependant cette solution a un coût. Tout d'abord financier puisque le prix de celles-ci s'avère être conséquent. A titre d'exemple, une batterie Powerwall d'une capacité de stockage de 13,5 kWh permettant une redistribution de l'énergie pour un ménage moyen, représente un coût d'environ 7 000€. La durée de vie des batteries peut aussi poser un problème puisqu'en moyenne elle est de seulement 10 ans. Le stockage de l'énergie a également un coût environnemental non négligeable puisque l'extraction des minéraux nécessaires à la fabrication, comme le lithium, affecte l'environnement. Enfin, le rendement des batteries ne leur permet pas de redistribuer l'ensemble de l'énergie initialement produite et une partie de l'énergie est perdue. La manière dont le milieu urbain est structuré, et notamment l'utilisation des macro-lots peut être utilisée comme levier pour pallier ce problème d'intermittence et de stockage. La mutualisation des systèmes énergétiques peut permettre de valoriser les flux d'énergie fatale à son maximum. [HAMPIKIAN Zélia]

Ensuite, la réflexion autour de l'utilisation de l'énergie de récupération pour pallier les enjeux de la transition énergétique est aujourd'hui grandissante. A l'image du solaire, de la biomasse, du vent, cette énergie est elle aussi considérée comme propre. Elle permet de valoriser de l'énergie qui sera forcément dégagée et en temps normal perdue. Ainsi, les rejets de CO₂ sont négligés et considérés comme nuls. En plus d'un effet environnemental positif, l'énergie de récupération est

économiquement intéressante. Elle permet de réduire les coûts de production ou de gestion d'une infrastructure. Composée de l'énergie issue de la chaleur des data centers, de l'incinération des déchets, de la récupération de chaleur perdue, elle possède un potentiel énergétique important qui aujourd'hui est très peu exploité. Rien que dans le secteur industriel, « le gisement national de chaleur fatale industrielle s'élève à 109,5 TWh ». [ADEME]

Cependant si aujourd'hui cette énergie n'est pas encore très développée, c'est qu'elle possède aussi sa part de faiblesse. En effet, elle est extrêmement dépendante de la situation géographique de l'activité qui l'émet et des possibles redistributions aux alentours. Or comme dit précédemment, un macro-lot est par définition composé d'activités variées. Cette énergie peut donc totalement y être exploitée. Mais à l'image du photovoltaïque, étant une énergie fatale, elle est confrontée aux mêmes difficultés. Pour valoriser au maximum l'énergie produite, il faut la redistribuer en évitant de la stocker. Ainsi des contraintes liées aux horaires d'activités et donc de production et de besoin énergétiques apparaissent. Là encore, la mutualisation de l'énergie peut être un levier.

Cet article a pour objectif de montrer si il est possible d'économiser (et en quelle proportion) de l'énergie sans utiliser de stockage via la mutualisation des systèmes énergétiques d'un macro-lot. L'hypothèse émise est qu'une économie significative est réalisable. Pour le démontrer une étude comparative sur le bilan énergétique est faite entre le cas d'une conception en un seul macro-lot (cas de la mutualisation) et une conception divisée en différentes fonctions (cas de la décentralisation). Une modélisation du système de consommation, de production et de récupération d'énergie du macro-lot est réalisée pour les deux situations pour effectuer ce bilan énergétique.

2. Méthode

2.1 Modèle théorique

Les différentes modélisations sont réalisées à partir de l'outil toaster intégral. Elles permettent de réaliser un bilan énergétique d'un macro-lot, dans un cas où le système énergétique de chaque fonction est décentralisé, à un cas où le système est mutualisé. Le calcul du bilan énergétique se compose en deux sous modèles : la consommation et la production d'énergie électrique.

La consommation est subdivisée en deux puisque la consommation énergétique due aux usages spécifiques hors chauffage et la consommation due au chauffage et à l'ECS ne varient pas selon les mêmes facteurs. Le premier varie selon l'utilisation des appareils électriques qui composent un logement et les comportements qu'ont les usagers vis-à-vis d'eux. Le

second varie selon les conditions extérieures et les performances énergétiques du bâtiment.

En ce qui concerne la production électrique, différents modes ont été cherchés (solaire, éolien, biomasse, etc.) Le modèle se base sur deux modes de production distincts, la production photovoltaïque et la récupération de chaleur d'un Data Center et d'un hypermarché. D'une part chacun possède des caractéristiques intéressantes pour produire de l'énergie dans un milieu urbain. D'autre part, l'intermittence de l'énergie photovoltaïque et les sources de récupération de chaleur présente dans un macro-lot permettront de bonnes capacités de mutualisation. L'ensemble du modèle est simulé en pseudo-dynamique sur 24h avec un pas de temps de 1h pour permettre d'observer les possibilités de distributions de la production suivant les puissances appelées.

Ensuite le modèle articule la consommation des usages spécifiques hors chauffage avec la production photovoltaïque et la consommation des chauffages et de l'ECS avec la récupération de chaleur. Enfin, la dernière étape permet de comparer le bilan énergétique des deux cas, décentralisé et mutualisé.

2.2 Application de la méthode

Le modèle théorique est appliqué au cas d'un macro-lot existant. Tout d'abord le choix de la période s'est porté sur 24h car comme il a déjà été dit, ce qui affecte les performances de la mutualisation est principalement l'articulation entre les activités des différentes fonctions du macro-lot et la production d'énergie fatale. Or cette différence s'observe sur une journée avec les différentes plages horaires des activités et de l'occupation suivant les fonctions du bâtiment (et donc des besoins énergétiques) mais aussi avec les différents horaires de production d'énergie fatale. Cette échelle temporelle permet donc une visualisation de ces variations. Raisonner par exemple sur un bilan énergétique annuel ne permet pas de montrer cette différence.

Ensuite, le modèle s'effectue sur une situation hivernale et une estivale. En effet, comme il est visible par exemple dans les résultats, la première situation, en hiver, a une consommation due au chauffage plus importante et une production solaire plus faible qu'en été. Confronter ces deux cas extrêmes d'un point de vue énergétique, permet d'obtenir deux situations de mutualisation très différentes.

Ce modèle se divise en deux modèles distincts, la consommation et la production d'énergie qui se subdivise en deux : la consommation du chauffage et de l'ECS, la consommation des usages spécifiques hors chauffage, la production photovoltaïque, la récupération de chaleur. De

chaque sous-modèle, il en résulte la puissance appelée ou produite à chaque heure de la journée.

La simulation de la consommation d'énergie finale de chauffage pour chaque fonction et de l'ECS pour les logements prend en compte 16 facteurs présentés dans le tableau 1. La consommation de l'ECS des bureaux et des commerces étant très faible par rapport aux autres consommations est considérée comme nulle. Pour la déterminer le modèle se base sur les données disponibles pour un certain nombre des variables et pour celles où des hypothèses sont émises, une justification leur est formulée. Ainsi, il est pris en considération les apports internes liés aux activités de chaque fonction par rapport à la surface et les apports solaires du vitrage. Ensuite les déperditions sont calculées à partir des déperditions liées à la ventilation du bâtiment et les déperditions via l'enveloppe du bâtiment pour chaque degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur et ce pour chaque heure de la journée. L'hypothèse a été posée que la température intérieure de chaque logement pouvait varier selon le confort souhaité par les habitants. Pour une température intérieure fixée à 19°C suivant les recommandations de la RT2012, elle varie entre 18 et 20°C entre chaque logement.

Pour l'ECS des logements le modèle considère un chauffe-eau centralisé pour cette fonction. Chacun des 1120 a un besoin en ECS de 200 litres avec une puissance nécessaire pour élever la température de l'eau de 1°C de 1,16W. Le calcul est effectué pour l'ensemble des logements et tient compte d'une température de l'eau des tuyaux en sortie donnée et d'une température en entrée variant entre l'été et l'hiver données dans le tableau 1. Le chauffage de l'eau est réalisé pendant les heures creuses et débute à minuit pour finir à 5h.

Ensuite pour la consommation énergétique des usages spécifiques hors chauffage, le modèle considère les principaux usages d'une journée type. [RTE, 2018] L'heure et la durée d'utilisation pour chaque usage étant variables d'un logement à l'autre, elles sont ici exprimées par une incertitude.

Le calcul de la consommation est ensuite réalisé pour l'ensemble des logements, bureaux et commerces ce qui permet d'obtenir, à travers la variation de la température intérieure et la variation de l'heure et de la durée d'utilisation des appareils électriques une courbe de charge de la consommation foisonnée.

Tableau 1 : variables exogènes de la modélisation de la consommation pour chaque fonction (logement, bureau, commerce)

| Intitulés | | L | B | C | Unités | Justifications |
|---|------------------|------------|----------------|--------|----------------------|---|
| Besoins en chauffage | | | | | | |
| Conductance | Ubat | 0,34 | 0,34 | 0,34 | W/m ² /an | Logement RT 2012 : 0,33 à 0,35 |
| Surface enveloppe | Senv | 25 585 | 1 993 | 2 451 | m ² | 1/3 de la surface totale de l'enveloppe |
| Volume | Qv | 185 750 | 65 000 | 81 250 | m ³ | |
| Surface vitrée | Svit | 12 383 | 4 333 | 5 417 | m ² | 1/6 de la surface plancher (RT 2012) |
| Facteur solaire du vitrage | FS | 0,55 | 0,55 | 0,55 | | Fenêtre métal en double vitrage |
| Surface plancher | Sp | 74 300 | 26 000 | 32 500 | m ² | |
| Rendement du système de chauffage | pf | 0,9 | 0,9 | 0,9 | | Chauffage électrique urbain d'un bâtiment collectif |
| Températures intérieures | Ti _t | 17-19 | 0-21 | 0-18 | °C | |
| Taux de renouvellement d'air | nv _t | | 0,2-0,5 | | | |
| Rayonnement solaire global instantané (hiver et été) | y _t | | 0-450 et 0-950 | | W/m ² | |
| Apports internes | ai _t | 0-4 | 0-7 | 0-7 | W/m ² | RT 2000 |
| Besoins énergétiques de l'ECS | | | | | | |
| Volume d'un ballon d'ECS | V | 200 | - | - | m ³ | |
| Puissance nécessaire pour élever la température de l'eau de 1°C | P | 1,16 | - | - | W | |
| Températures d'eau en entrée | Tee | 10-12 | - | - | °C | Variation selon l'été et l'hiver |
| Températures d'eau en sortie | Tes _t | 0-55 | - | - | °C | |
| Besoins des usages spécifiques hors chauffage | | | | | | |
| Éclairage | | 8 | 10 | 10 | W/m ² | Norme NF X 35-102 |

En ce qui concerne la production, celle-ci est elle aussi divisée en deux, la production photovoltaïque et la récupération de chaleur. Tout d'abord la production photovoltaïque est choisie pour ce modèle car dans un milieu urbain très dense c'est ce type de production qui est généralement privilégié à d'autres et plus couramment mis en place. Ensuite, les activités des fonctions présentes dans les macro-lots comme les bureaux et les commerces, permettent pour la récupération de chaleur, un potentiel de récupération et de distribution intéressant.

La production de panneaux photovoltaïques dépend de plusieurs facteurs. Pour notre étude, elle a été considérée avec trois facteurs : le rayonnement solaire incident pour chaque heure de la journée dans le cas le plus favorable, le 21 juin, et le cas le plus défavorable, le 21 décembre, le rendement global des panneaux photovoltaïques et la surface de panneaux.

Ce modèle considère que chacun des panneaux reçoit le même rayonnement ce qui est en réalité différent puisque sur une surface aussi vaste, l'ombrage, les rayonnements directs, diffus

et réfléchis varient. De plus le rendement d'un panneau solaire est lié aux conditions climatiques. Dans certains cas elles peuvent détériorer le rendement. Par exemple, par temps nuageux, les panneaux produisent moins d'énergie car ils reçoivent moins de lumière. Il en est de même pour la température extérieure, le vent, etc. Similairement le rendement des panneaux photovoltaïques fluctue suivant les modalités techniques (ondulateur, température des modules, pertes dans les câbles, etc.) Enfin, les conditions d'installation comme l'inclinaison et l'orientation affectent également ce rendement. Pour ce modèle, l'ensemble de ces facteurs est considéré de manière globale.

Enfin le macro-lot utilisé pour l'étude de cas n'est pas équipé de panneaux. Pour déterminer une surface à chacune des fonctions et ainsi répartir la production photovoltaïque, l'hypothèse émise est que la surface est proportionnelle à la surface de plancher.

Tableau 2 : variables exogènes de la modélisation de la production photovoltaïque pour chaque fonction (logement, bureau, commerce)

| Intitulés | | L | B | C | Unités |
|--|----------------|------|---------------|------|------------------|
| Surface des panneaux | S | 9000 | 3250 | 4000 | m ² |
| Rendement | a | | 0,2 | | |
| Rayonnement solaire global instantané (hiver et été) | y _t | | 0-450 et -950 | | W/m ² |

La récupération de chaleur se base sur l'énergie qui est récupérable des systèmes de refroidissement. Pour ce cas d'étude, il a été choisi de doter les bureaux d'un Data Center (DC) où la chaleur de celui-ci est récupérée pour être réutilisée. En effet, ces infrastructures qui stockent d'importants volumes de données nécessitent d'être refroidies et peuvent donc permettre de récupérer de l'énergie. Ici, le système de refroidissement choisi est un système eau-eau offrant une meilleure rentabilité qu'un système eau-air. Néanmoins les performances de récupération étant très variées, l'étude est faite sur deux cas différents. Le premier, cas défavorable, est composé d'un système eau-eau avec un aéroréfrigérant. C'est-à-dire que l'eau froide circule dans les circuits du DC ce qui les refroidit. L'énergie thermique du fluide est transférée vers l'air extérieur permettant de la chauffer. Ce système possède un rendement de performance faible. A l'inverse le deuxième cas, toujours avec un système eau-eau, utilise le même circuit pour refroidir et chauffer. Ainsi l'eau froide des tuyaux qui circule dans le DC se réchauffe, est réinjectée dans le système de chauffage des bureaux dans le cas sans mutualisation et dans le système de chauffage de l'ensemble du macro-lot et d'ECS des logements dans le cas avec mutualisation. Puis l'eau une fois utilisée et froide recircule dans le DC. Ce système a facteur de récupération plus important que la première situation.

La deuxième solution choisie pour récupérer de la chaleur est d'utiliser l'énergie frigorifique nécessaire ou les besoins en froid d'une infrastructure. Pour produire du froid, ces systèmes de production de froid rejettent de l'air chaud qui n'est généralement pas réemployé et donc est perdu. Ici ce système est employé pour l'hypermarché présent dans la zone dédiée aux commerces puisqu'il nécessite de gros besoins frigorifiques (meubles frigorifiques, chambres froides). Les données sur le nombre de ces appareils réfrigérants sont présentées dans le tableau 3. Elles se basent sur un hypermarché d'une surface

semblable au lieu d'étude. Enfin, le facteur de récupération de chaleur de ces appareils fluctue lui aussi énormément. C'est pourquoi la simulation considère deux cas, l'un favorable avec des rendements de récupération élevés et l'autre défavorable avec des rendements faibles. Considérer deux cas, l'un favorable avec un facteur de récupération performant et l'un faible permet une analyse avec deux ordres de grandeurs différents.

Tableau 3 : variables exogènes de la modélisation de la récupération de chaleur de l'hypermarché

| Intitulés | | | Unités |
|--|--------------|-------|--------|
| Chambre froide positive Fruits et Légumes 120m ³ | FL | 9 | kW |
| Chambre froide positive Boucherie 120m ³ | Bouc | 9 | kW |
| Chambre froide positive Charcuterie/Traiteur 100m ³ | TC | 8.2 | kW |
| Chambre froide positive SAS 160 m ³ | SAS | 12.3 | kW |
| Chambre froide négative Surgelés 100 m ³ | Surg | 9 | kW |
| Chambre froide négative Boulangerie 50 m ³ | Boul | 4.8 | kW |
| Frigo négatif | $P_{f_{nu}}$ | 700 | W |
| Frigo positif | $P_{f_{pu}}$ | 500 | W |
| Nombre Frigo négatif | n_{f_n} | 160 | U |
| Nombre Frigo positif | n_{f_p} | 200 | U |
| Performance récupérateur de chaleur | F | 50-90 | % |

Tableau 4 : variables exogènes de la modélisation de la récupération de chaleur du Data Center

| Intitulés | | | Unités | Justification |
|--|-------|-----|------------------|-------------------|
| Surface du Data Center | S | 500 | m ² | |
| Consommation surfacique | C_s | 580 | W/m ² | Moyenne Française |
| Facteur récupération système eau/eau | f_b | 41 | % | |
| Facteur récupération système entièrement eau | f_e | 83 | % | |

2.3 Méthode comparative

L'étude compare deux simulations, une considérant la mutualisation de la consommation et de la production d'énergie, et une autre considérant la consommation et la production par fonction (commerce, résidence, bureau). Le bilan énergétique du macro-lot dans le cas de la mutualisation et dans un cas sans permet dans un premier temps de valider ou non l'hypothèse posée : la mutualisation urbaine permet une économie significative d'énergie. Dans un second temps cette comparaison permet, si économie il y a, de montrer la couverture sur 24h possible et ainsi la proportion d'économie réalisable dans un cas défavorable en hiver et favorable en été.

De plus, la comparaison sur ces deux cas (été et hiver) permet de mettre en évidence les variables qui affectent l'économie possible via la mutualisation. Notamment si les conditions climatiques extérieures affectent la mutualisation des systèmes énergétiques et dans quelles proportions.

3. Etude de cas

Le macro-lot est une manière de penser et fabriquer la ville récente qui a émergé dans les années 2000 et qui s'est nettement développé ces dernières années notamment au travers des ZAC. Il en existe une multitude de tailles variables et qui accueillent des activités toutes aussi variées. De plus sur le plan réglementaire, un macro-lot n'est pas régi sur l'aspect dimensions, capacités d'accueil, équipements ou types de fonctionnalités.

Le choix pour cette étude est le macro-lot Rosa Parks de Paris. Ce choix s'est porté sur ce macro-lot car c'est un cas typique. En effet, malgré leur variété, les macro-lots regroupent de façon presque systématique les fonctions logements, bureaux et commerces. Or ici il est composé de ces trois fonctions ainsi qu'une partie dédiée aux équipements publics et aux

stationnements. La modélisation ne considère que les trois premières fonctions qui permettent de vérifier la validité de l'hypothèse. Ils représentent plus de 80% de la superficie totale, regroupent les fonctions les plus énergivores et permettent également d'en ressortir une récupération de chaleur significative pour permettre d'illustrer les leviers permettant de maximiser l'économie d'énergie réalisable via mutualisation.

En plus des fonctions qu'il regroupe, Rosa Parks est composé d'une quantité de logements, commerces et bureaux suffisamment importante pour là encore mettre en lumière les gains d'énergie possibles.

Enfin, pour permettre de vérifier la validité de l'hypothèse, il est nécessaire de déterminer un bilan énergétique des macro-lots. Or pour réaliser la modélisation de ce bilan, de nombreux facteurs sont nécessaires comme les performances énergétiques du bâtiment ou les dimensions de celui-ci. Or réaliser l'étude sur le cas de Rosa Parks permet d'obtenir les informations suffisantes à la modélisation.

4. Résultats et analyses

4.1 Production solaire

L'intermittence de la production photovoltaïque est le principal problème lorsque l'on souhaite articuler la production et la consommation. En effet, la consommation due à une activité s'accorde rarement avec la production. C'est notamment flagrant en ce qui concerne le cas des logements puisque le pic de consommation a lieu lorsque le soleil est couché, que ce soit en hiver ou en été.

Néanmoins, en hiver la mutualisation permet une économie d'énergie par rapport à la situation décentralisée, mais celle-ci ne s'avère pas être significative vis-à-vis de la consommation globale. Sur une journée, la mutualisation permet une économie d'énergie de seulement 540kWh soit 1,3% de la consommation des usages spécifiques hors chauffage du macro-lot.

Cela s'explique car la production énergétique est faible en hiver. Ainsi les bureaux et les commerces qui ont leurs activités sur la plage horaire de production, et donc des besoins énergétiques sur cette période, utilisent directement la production. Similairement, bien que la consommation des

logements soit faible lorsque les panneaux produisent, celle-ci s'avère être insuffisante pour qu'il y ait d'importants excédents à transférer dans les autres fonctions.

Tableau 5 : Bilan énergétique sur 24h du macro-lot Rosa Parks en hiver

| Intitulés | Logements | Commerces | Bureaux | | Décentralisé | Mutualisé |
|--|-----------|-----------|---------|--|--------------|-----------|
| Consommations des usages spécifiques hors chauffage en MWh | 19,31 | 10,44 | 12,99 | | 42,74 | |
| Productions photovoltaïques en MWh | 4,68 | 2,08 | 1,69 | | 8,45 | |
| Couvertures en MWh | 4,14 | 2,08 | 1,69 | | 7,91 | 8,45 |
| Taux de couverture énergétique en % | 21% | 20% | 13% | | 19% | 20% |
| Excédents en MWh | 0,54 | 0,00 | 0,00 | | 0,54 | 0,00 |

En revanche, en été, la mutualisation permet une économie d'énergie de 3,2 MWh ce qui représente 7,5% d'économie sur une journée.

En effet, les besoins en énergie des usages spécifiques hors chauffage sont similaires. Les usages des appareils électriques ne varient pas d'une saison à une autre. Ainsi, tandis que les besoins sont inchangés, la production photovoltaïque elle a augmenté ce qui a pour conséquence d'obtenir des excédents pour les commerces et pour les logements. Ils sont notamment plus importants pour la fonction résidentielle puisque d'une part sa surface lui offre une production plus élevée et d'autre part car les besoins sont très faibles pendant les heures de production. Ce surplus peut donc couvrir les besoins énergétiques des bureaux qui sans la mutualisation auraient dus être couverts autrement.

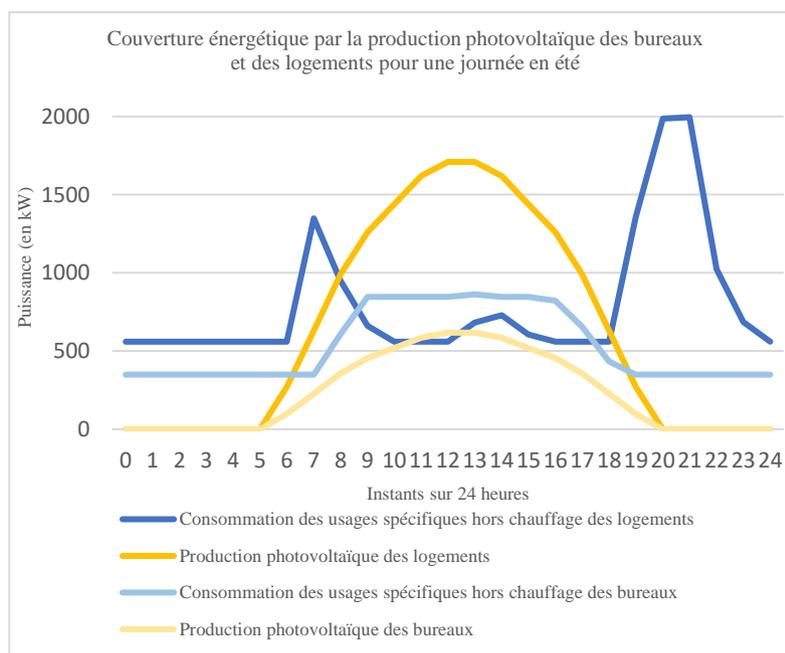


Tableau 6 : Bilan énergétique sur 24h du macro-lot Rosa Parks en été

| Intitulés | Logements | Commerces | Bureaux | | Décentralisé | Mutualisé |
|--|-----------|-----------|---------|--|--------------|-----------|
| Consommations des usages spécifiques hors chauffage en MWh | 19,31 | 10,44 | 12,99 | | 42,74 | |
| Productions photovoltaïques en MWh | 15,84 | 7,04 | 5,72 | | 28,6 | |
| Couvertures en MWh | 8,16 | 6,27 | 5,72 | | 20,15 | 23,35 |
| Taux de couverture énergétique en % | 42% | 60% | 44% | | 47% | 55% |
| Excédents en MWh | 7,68 | 0,77 | 0 | | 8,45 | 5,25 |

4.2. Récupération de chaleur

4.2.1 Récupération de chaleur des bureaux

La récupération de chaleur du Data Center est particulière puisque celle-ci est constante sur l'ensemble de la journée. En effet, les DC fonctionnent en permanence pour stocker les informations et ont donc des besoins en énergie stables. De faibles variations sur 24h peuvent exister, mais étant très faibles sur cette échelle temporelle elles sont considérées comme nulles.

Ainsi suivant le système de récupération utilisé, il est possible de récupérer 2,85 MWh avec un rendement de 41% et 5,78 MWh avec un rendement de 83%. Cependant les besoins en chauffage

des bureaux et des commerces sont existants sur une petite période de la journée. La nuit, les bâtiments sont vides et n'ont par conséquent pas besoin d'être chauffés. Ensuite, les apports solaires sur la journée suffisent à réchauffer les bureaux et les commerces, il n'y a donc aucun besoin en chauffage pendant cette durée. Seulement 16% du temps de l'énergie est récupérée est utilisée pour les besoins. Et bien que ce système permette de couvrir 33% à 58% des besoins, une grande partie de ce qui est récupérée n'est pas valorisée comme on peut le voir avec la part élevée d'excédent. De plus, en été la situation est encore plus critique car les besoins en chauffage sont nuls, donc 100% de l'énergie récupérée est perdue.

Tableau 7 : Récupération de la chaleur sur 24h des bureaux en hiver

| Intitulés | Défavorable f=41% | Favorable f=83% |
|--|-------------------|-----------------|
| Consommations dû aux besoins en chauffage en MWh | 1,5 | |
| Récupérations de chaleur en MWh | 2,85 | 5,78 |
| Taux de couverture en MWh | 0,48 | 0,84 |
| Taux de couverture en quantité en % | 33% | 58% |
| Temps de couverture en % | 16% | 16% |
| Excédents en MWh | 2,38 | 4,93 |

4.2.2 Récupération de chaleur des commerces

Similairement au DC, la quantité de chaleur récupérée est constante sur 24h. Ici les réfrigérateurs fonctionnent en continu et les seules variations de puissances appelées qui peuvent être relevées sont lorsque les réfrigérateurs sont ouverts par les usagers. Cependant cette variation n'a, là encore, que très peu d'impact sur la consommation globale et est donc négligée.

Pour les commerces le bilan est semblable à celui de la récupération de chaleur des bureaux. De part des besoins énergétiques regroupés sur une courte durée, une grande partie de l'énergie est perdue. Et malgré une production plus importante que la consommation, tous les besoins ne sont pas couverts. Ici c'est 2,39 MWh avec un rendement de 50% et 4,29 MWh pour un rendement de 90% qui est perdue.

Tableau 8 : Récupération de la chaleur sur 24h des commerces en hiver

| Intitulés | Défavorable F=50% | Favorable F=90% |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------|
| Récupérations de chaleur en MWh | 3,17 | 5,71 |
| Taux de couverture en MWh | 0,78 | 1,42 |
| Taux de couverture en quantité en % | 44% | 79% |
| Temps de couverture en % | 25% | 25% |
| Excédents en MWh | 2,39 | 4,29 |

Or comme il a été précisé précédemment, l'énergie thermique est une énergie difficilement stockable. Elle engendre un coût élevé et ne permet pas d'utiliser l'énergie disponible à son maximum. C'est pourquoi, concevoir le réseau énergétique du

macro-lot dans son ensemble permet de mutualiser les besoins et de réduire considérablement les excédents perdus.

En effet, en hiver à l'inverse des bureaux et des commerces, les logements ont des besoins en chauffages répartis sur une plus grande période journalière. Ils ont besoin constamment d'être à

une température donnée, même la nuit. Et donc en dehors de la période où les apports solaires suffisent à atteindre la température fixée, les logements ont constamment besoin d'être chauffés. De plus, une partie de l'eau chauffée récupérée peut servir au besoin en ECS des logements. Par conséquent l'énergie récupérée est utilisée sur 71% du temps. Et la mutualisation

permet en hiver de couvrir 21% (soit 4,14 MWh) des besoins avec des rendements de récupération faibles et 39% (soit 7,68 MWh) avec des rendements élevés. De plus en été, la mutualisation permet de couvrir une partie des besoins en ECS des logements et d'utiliser en partie une énergie qui serait totalement perdue sans.

Tableau 9 : Récupération de la chaleur sur 24h mutualisée en hiver et en été

| Intitulés | Défavorable | Favorable |
|------------------------------------|-------------|-----------|
| Récupérations chaleur en MWh | 6,02 | 11,49 |
| Cas en hiver | | |
| Taux de couverture en hiver en MWh | 4,14 | 7,68 |
| Taux de couverture en hiver en % | 21% | 39% |
| Temps de couverture en % | 71% | 71% |
| Excédents en MWh | 1,88 | 3,80 |
| Cas en été | | |
| Taux de couverture en été en MWh | 1,27 | 1,55 |
| Taux de couverture en été en % | 68% | 83% |
| Temps de couverture en % | 25% | 25% |
| Excédents en MWh | 4,76 | 9,94 |

4.2.3 Récupération de chaleur à l'échelle du macro-lot

Ainsi à l'échelle du macro-lot des économies importantes peuvent être faites. En hiver, comme on peut le voir avec l'annexe 1, mutualiser permet d'utiliser l'énergie récupérée le jour entier hormis lorsque les apports solaires suffisent à chauffer le macro-lot. Le taux de couverture est presque doublé et ainsi, avec un rendement fort il passe de 2,26 MWh contre 1,26 MWh. En été, alors que dans un cas décentralisé aucun besoin ne peut être couvert, la mutualisation permet de couvrir

quant à elle 1,27 MWh (soit 68% des besoins) pour un rendement faible et 1,55 MWh (soit 82%) pour un rendement fort.

Ensuite, même en mutualisant, les excédents en été restent importants. En effet, l'énergie récupérée est identique en hiver et en été puisqu'elle dépend de l'activité des commerces et des bureaux qui ne changent pas suivant ces deux périodes tandis qu'il n'y a plus de besoin en chauffage en été, seuls les besoins en ECS des logements perdurent.

Tableau 10 : Bilan énergétique sur 24h mutualisé en hiver et en été

| Intitulés | Cas en hiver | | | | Cas en été | | | |
|---|--------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|-------------|-----------|
| | Décentralisé | | Mutualisé | | Décentralisé | | Mutualisé | |
| | Défavorable | Favorable | Défavorable | Favorable | Défavorable | Favorable | Défavorable | Favorable |
| Consommations du chauffage (et de l'ECS) en MWh | 19,54 | | | | 1,88 | | | |
| Récupérations de chaleur en MWh | 6,03 | 11,49 | 6,03 | 11,49 | 6,02 | 11,49 | 6,03 | 11,49 |
| Taux de couverture en MWh | 1,26 | 2,26 | 4,14 | 7,68 | 0 | 0 | 1,27 | 1,55 |
| Taux de couverture en % | 6% | 12% | 21% | 39% | 0,00% | 0,00% | 68% | 82% |
| Excédents en MWh | 4,77 | 9,22 | 1,88 | 3,8 | 6,02 | 11,49 | 4,76 | 9,94 |

4.3. Bilan énergétique global à l'échelle du macro-lot

A l'échelle globale du macro-lot de Rosa Parks, en regroupant le bilan énergétique entre la consommation des usages spécifiques et la production photovoltaïque avec celui de la consommation de chauffage et d'ECS et la récupération de chaleur, il est possible de voir l'importance de l'économie d'énergie qui peut être réalisée en mutualisant le système énergétique. Ce gain n'est pas négligeable puisque c'est près de 5% à 11% de la consommation qui est couverte.

Comme dit précédemment, durant l'été la mutualisation de la récupération de chaleur ne permet une forte économie d'énergie. Ainsi avoir des équipements de récupération de chaleur performant (cas favorable d'un rendement élevé) ne permet pas

non plus en cette période de faire de fortes économies. La mutualisation de la récupération de chaleur ne peut servir que pour l'ECS des logements donc un fort rendement ne permet une économie de seulement 300kWh, soit 1%. En revanche en hiver, la récupération de chaleur qui couvre les besoins en chauffage s'est avérée importante et avoir des équipements performants permet d'augmenter énormément l'économie et de passer de 5% (cas défavorable) à 10% (cas favorable) lors de la mutualisation.

Ensuite, en hiver la plus grande partie de la production photovoltaïque est utilisée par la fonction qui la produit. La mutualisation n'a qu'un faible impact et économise 540kWh. Cependant en été, la mutualisation permet d'utiliser cette énergie pour couvrir une plus grande part de la consommation des usages spécifiques hors chauffage.

Tableau 11 : Bilan énergétique globale sur 24h mutualisé en hiver et en été

| Intitulés | | Cas en hiver | | Cas en été | |
|-------------------|--------------------------------------|--------------|-----------|-------------|-----------|
| | | Défavorable | Favorable | Défavorable | Favorable |
| Global | Consommations en MWh | 62,28 | | 44,62 | |
| | Productions en MWh | 14,47 | 19,93 | 34,62 | 40,08 |
| Cas individualisé | Production utilisée en MWh | 9,17 | 10,17 | 20,15 | 20,15 |
| | Production utilisée en % | 63% | 51% | 58% | 50% |
| | Excédents en MWh | 5,3 | 9,76 | 14,47 | 19,93 |
| Cas mutualisé | Production utilisée en MWh | 12,59 | 16,13 | 24,6 | 24,9 |
| | Production utilisée en % | 87% | 81% | 71% | 62% |
| | Excédents en MWh | 1,88 | 3,8 | 10,02 | 15,18 |
| Comparaison | Economies sur la consommation en MWh | 3,42 | 5,96 | 4,45 | 4,75 |
| | Economies sur la consommation en % | 5% | 10% | 10% | 11% |

Pour ce cas d'étude, bien que les excédents aient considérablement diminué, la mutualisation ne permet pas de valoriser l'ensemble de la production d'énergie que ce soit pour la récupération d'énergie comme pour la production photovoltaïque. Pour valoriser les excédents restants, différentes possibilités existent. Tout d'abord, le surplus produit peut être revendu. Ensuite il peut être stocké pour être réutilisé ultérieurement mais, comme il a déjà été dit cette solution n'est pas la plus efficace tant sur l'aspect énergétique, que financier ou écologique. Enfin, dans ce cas d'étude la mutualisation a été modélisée sur seulement trois activités différentes. Or un macro-lot est généralement composé de plus d'activités. Aussi en mutualisant d'autres fonctions, les économies réalisées

pourraient être plus importantes à condition de varier les activités selon les besoins, la production possible et leurs horaires. Or comme on peut le voir avec les graphiques en annexes, les excédents sont produits lors de la journée (entre 9h et 16h en hiver avec la récupération de chaleur et entre 8h et 17h en été via la production photovoltaïque). Coupler le réseau à une activité journalière qui possède des besoins en chauffage et en ECS sanitaire comme une école pourrait donc diminuer ces excédents. Si les besoins en chauffage de cette activité s'avèrent trop faibles dû par exemple aux apports solaires, d'autres activités sont possibles comme une piscine municipale. Ensuite, il en est de même en été. Les excédents qui sont en grande partie produits par la récupération de chaleur sur l'ensemble de la

journée (hormis lors de l'utilisation pour les ballons d'ECS), et par la production photovoltaïque, peuvent être réduits en associant d'autres activités.

5. Discussion

Dans cette étude de cas, il est possible de déterminer l'économie d'énergie réalisable en mutualisant le système énergétique d'un macro-lot via un ensemble pertinent de facteurs. Selon le degré de précision voulu, et le temps imparti pour réaliser ce bilan, il est possible d'affiner le bilan énergétique d'un bâtiment ou dans ce cas précis d'un macro-lot. La consommation des usages spécifique hors chauffage tient compte des usages les plus représentatifs d'un jour du quotidien typique. Pour le chauffage, il considère les facteurs d'apports et de déperditions les plus influents dans le bilan thermique d'un bâtiment. Le nombre de logements, bureaux et commerces permet, à travers un foisonnement, de donner une courbe de charge de la puissance appelée suivant un idéal type pour les usages spécifiques hors chauffage comme pour le chauffage. Néanmoins pour affiner les résultats de cette simulation, certains facteurs à forte influence considérés globaux peuvent être détaillés et d'autres être développés comme l'inertie thermique du bâtiment. Ensuite la production se base elle aussi sur les facteurs les plus influents. Pour le photovoltaïque, le rendement proposé permet d'approximer l'ensemble des pertes qui dépendent de nombreuses caractéristiques (climatiques, techniques, inclinaison, orientation).

Cette méthode permet de réaliser une comparaison mutualisée/décentralisée sur deux jours critiques. Elle permet en partie de mettre en lumière les effets que les conditions climatiques induisent sur le bilan énergétique. Par exemple, en hiver, dus à des températures extérieures faibles, les besoins énergétiques en chauffage sont importants et en été ils sont inexistantes alors que la récupération de chaleur est identique. Inversement, tandis que la consommation des usages spécifiques hors chauffage ne change pas, la production photovoltaïque est bien plus élevée en été. Ensuite le calcul est réalisé sur 24h avec un pas d'une heure. Cela permet de montrer les différences de puissance appelée à un pas suffisamment précis pour observer les variations entre les activités qui diffèrent ainsi que les variations de production sur le jour. Réduire l'échelle pour être plus précis alourdirait le calcul sans apporter plus de poids aux résultats. En effet, ce n'est pas nécessaire d'aller vers un cas plus précis car les variations des activités et les variations de production sont visibles à cette échelle.

Néanmoins, les bilans énergétiques des bâtiments, des infrastructures ou des macro-lots sont en temps normal effectués sur une année, notamment pour permettre de le comparer avec

d'autres cas d'étude. Ce qui permet une meilleure prise en compte des variations climatiques qui impactent fortement le bilan mais aussi des variations dues à l'utilisation ou l'occupation du bâtiment. Le modèle montre qu'il y a de nombreuses variations de consommation et de production suivant un jour d'été ou d'hiver. Mais ces deux cas extrêmes ne suffisent pas pour réaliser un bilan énergétique annuel pertinent. De plus, pour chacune des fonctions (logements, commerces, bureaux), le modèle considère un jour type correspondant à une journée en semaine. Si le calcul est réalisé sur le dimanche par exemple, les bureaux et les commerces n'auraient eu aucune consommation. En effet, leur consommation est calculée pour les jours d'occupation des lieux. Ainsi les jours ou les bâtiments ne sont pas utilisés, comme le weekend pour les bureaux ou le dimanche pour les commerces, c'est l'ensemble de la production journalière qui n'est pas utilisée. Ainsi, il pourrait être intéressant de compléter cette simulation en effectuant un bilan énergétique sur deux jours types, un correspondant au milieu de semaine et un au dimanche pour chaque mois de l'année. Ce qui permettrait de considérer les variations dues aux conditions climatiques et dues à l'utilisation et l'occupation. Pour finir, il suffirait d'extrapoler ces résultats sur l'année et ainsi obtenir le bilan annuel.

En ce qui concerne le calcul de la consommation du chauffage, il considère les facteurs à forte influence. Par manque de données sur les caractéristiques du macro-lot, les calculs des facteurs s'arrêtent à un degré de précision suffisant pour obtenir un bilan énergétique et vérifier l'hypothèse. En effet, il se base sur le calcul utilisé pour des diagnostics de performances énergétiques qui servent pour par exemple savoir si un bâtiment qui doit être rénové peut accéder à des subventions publiques. De plus, le modèle pseudo-dynamique d'une période de 24h avec un pas de 1h permet d'assimiler le calcul aux variations de la température extérieure vis-à-vis de la température intérieure réglementée. Cette température intérieure, bien que normée, peut varier d'un logement à l'autre. C'est pourquoi, pour chacun des 1120 logements, la température varie de plus ou moins un degré. Cependant les degrés-heures (différences de températures extérieures et températures intérieures souhaitées) ne tiennent pas compte des effets d'inertie des parois du macro-lot qui peuvent avoir un impact sur le bilan énergétique. L'inertie permet de stocker et déstocker l'énergie présente dans sa structure (murs, plancher, etc.). Elle se compose de l'amortissement qui représente la différence d'énergie entre l'entrée et la sortie de la paroi, et de la période de déphasage qui représente le décalage dans le temps du transfert de la chaleur. Ces facteurs dépendent des caractéristiques des matériaux qui composent les parois comme l'épaisseur, la chaleur massique, la masse volumique, la conductivité et de la surface des parois.

Considérer l'inertie affinerait ainsi le calcul des besoins en chauffage.

6. Conclusion

Dans ce modèle le bilan énergétique du macro-lot se base sur un calcul de la consommation énergétique en deux temps, celle des usages spécifiques hors chauffage et celle du chauffage et de l'eau chaude sanitaire. La production énergétique est composée de panneaux photovoltaïques assimilée aux usages et de la récupération de chaleur assimilée au chauffage et à l'ECS. Le calcul est réalisé sur 24h pour un jour d'été et un d'hiver, dans un cas où le système énergétique de Rosa Parks est mutualisé et dans un cas où il est décentralisé pour les trois fonctions du macro-lot (logements, bureaux et commerces). La comparaison du bilan énergétique sur ces deux situations, en hiver et en été montre bien que la mutualisation permet, sans système de stockage, une économie d'énergie significative. Celle-ci s'élève dans un cas où les rendements de récupération de chaleur sont faibles à 12,59 MWh en hiver et à 24,6MWh en été et dans un cas où les rendements de récupération de chaleur sont élevés de 16,13 MWh en hiver et 24,9 MWh en été.

Des travaux futurs sont nécessaires pour d'une part, affiner les calculs notamment de la consommation énergétique et d'autre part, réaliser ce bilan sur une année entière. En effet l'augmentation de l'échelle de calcul à une année faciliterait l'étude et la comparaison avec d'autres cas d'étude de macro-lots. Enfin l'utilisation de trois fonctions suffit pour mettre en lumière l'intérêt de la mutualisation. Cependant en ajouter peut permettre de déterminer d'autres leviers d'économie d'énergie des macro-lots. En effet, d'autres modes de production (cogénération via la biomasse, récupération de chaleur des douches, etc.) peuvent être appliqués à un macro-lot

Bibliographie

- CEREMA, *PUP- Projet Urbain Partenarial* [en ligne]. 2017. <http://outil2amenagement.cerema.fr/pup-projet-urbain-partenarial-r471.html>
- LUCAN Jacques, *La diversité des macro-lots* [en ligne]. https://www.youtube.com/watch?v=gUhndb_fOIA&t=768s
- RAINEAU Laurence, *Vers une transition énergétique?* [en ligne]. EDP sciences : Natures Sciences Sociétés, vol.19, 2011, p133 à 143, 2011. <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2011-2-page-133.htm>.
- LINCOT Daniel, *Raison présente : Lumière du ciel, énergie de la Terre. La conversion photovoltaïque au service des hommes.* [en ligne]. Flux, (N° 196), p. 27-37, 2015. <https://www.cairn.info/revue-raison-presente-2015-4-page-27.htm>
- HAMPIKIAN Zélia, *Structuration urbaine d'un réseau de chaleur et énergie fatale : la proximité comme variable dynamique.* [en ligne]. Flux, (N° 109-110), p. 9-22, 2017. <https://www.cairn.info/revue-flux-2017-3-page-9.htm>

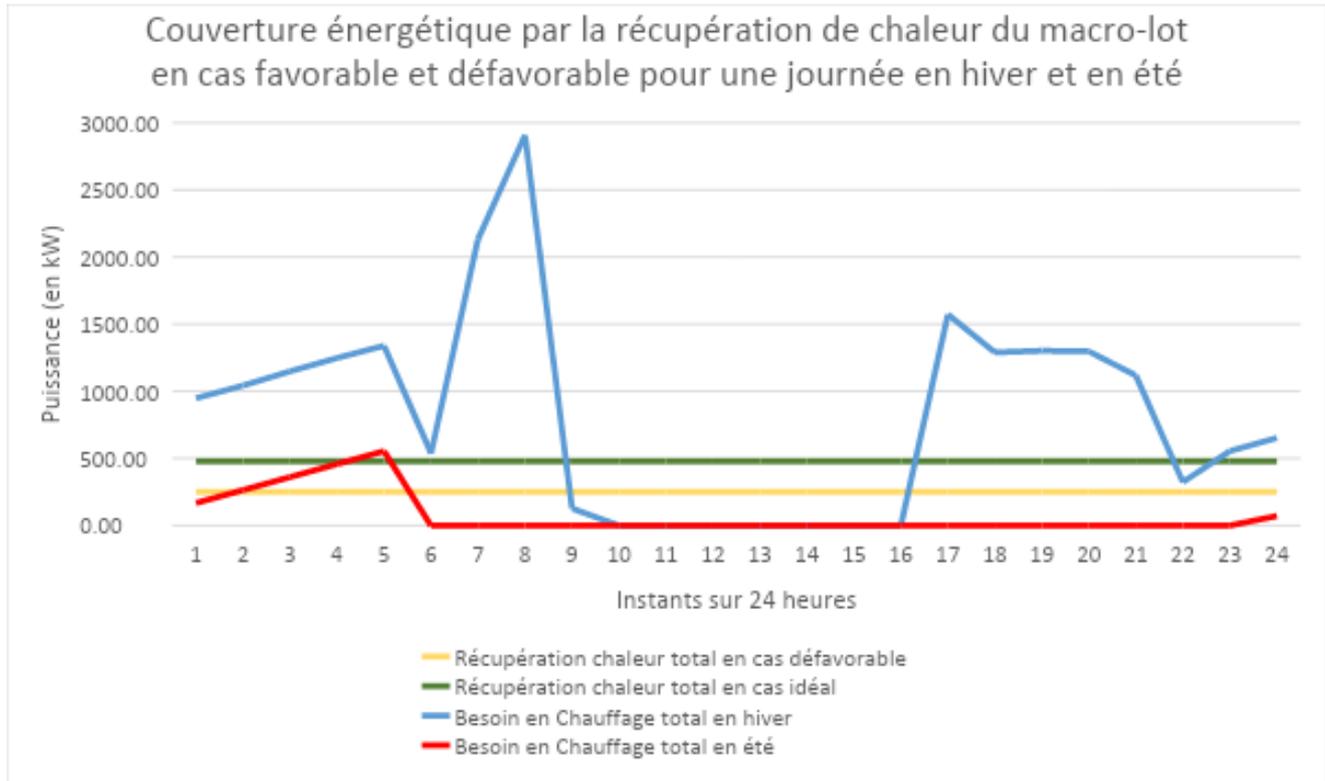
ADEME, document de communication « La chaleur fatale industrielle : un potentiel à exploiter »

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_109_faits_et_chiffres.pdf

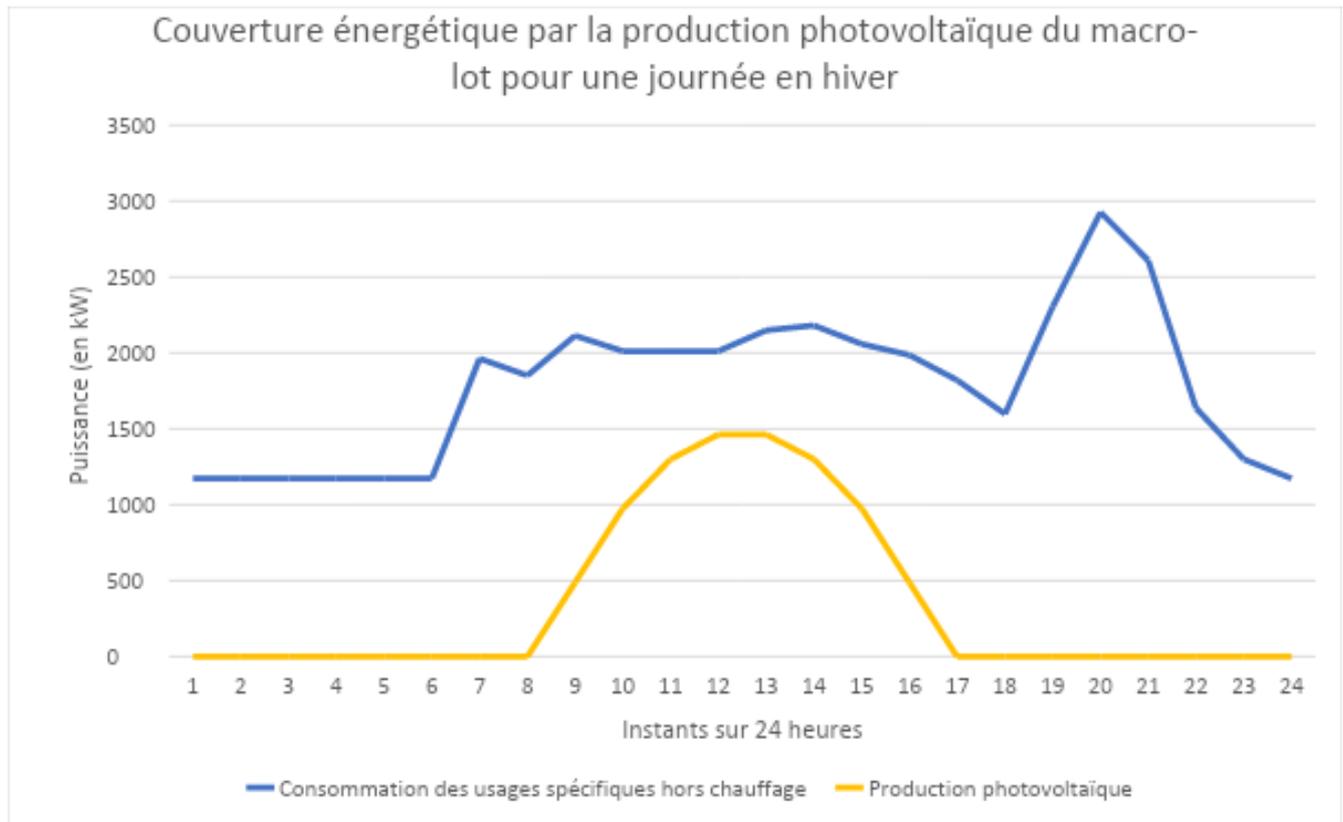
BAHERS Jean-Baptiste, DURAND Mathieu, *Le retour de la proximité ! Quelles implications pour les services urbains en réseau ?* [en ligne]. Flux, (N° 109-110), p. 1-8, 2017. <https://www.cairn.info/revue-flux-2017-3-page-1.htm>

Annexes

Annexe 1



Annexe 2



Annexe 3

